

[2] 水和熱に起因する温度ひびわれ幅の予測について

正会員 長滝重義 (東京工業大学工学部)
 正会員 ○ 佐藤良一 (宇都宮大学 工学部)

1. まえがき

マッシブなコンクリート構造物に発生する温度ひびわれは、一般に、その幅が大きく耐久性、水密性などの観点から問題となることが多い。これまで種々のひびわれ防止対策がとられてきたが、実際にはひびわれ発生がしばしばみられた。過度なひびわれ防止対策は不経済な設計・施工にいたるため、場合によっては、ひびわれの発生を認め目地や鉄筋を適切に配置して、ひびわれ幅を許容範囲内に収めようとする考え方が認識され、温度ひびわれ幅の予測や制御設計法の確立がよく求められるようになってきた。

水和熱に起因する温度ひびわれ対策としては、これまで、ひびわれの発生を防止しようとの立場が大勢であったため、発生したひびわれ幅の制御を目的とした予測方法は少ない。しかし、ACI 207委員会¹⁾、BS 5337²⁾、及び長滝ら³⁾により2、3の方法は提案されている。これらの方法は適用範囲を適切に選択すれば実用に供すると思われるが、弾性的な考え方に基づいているため、ひびわれ幅におよぼす温度上昇時のコンクリートの圧縮応力や温度降下速度などの影響を考慮することができない。

本研究は、このようなことから、よう壁などの壁体構造物の鉄筋による温度ひびわれ幅の制御設計法の確立に資することを目的として、任意の温度履歴に適用可能な温度ひびわれ幅の一予測方法を提案する。

なお、本方法は、主としてL/H (L:ブロック長, H:ブロック高さ)で決まる拘束度のもとでひびわれ間の鉄筋ひずみ分布の解析に主眼をおいたものであって、ひびわれ間隔は本文では与えられるものとしている。

2. 材料の特性

2.1 コンクリート

材令と温度履歴を考慮した有効材令 t_e における圧縮強度 f'_{c,t_e} 、引張強度 f_{t,t_e} 、弾性係数 E_{c,t_e} 、クリープ係数 ϕ_{t_e} は岩城らの研究結果⁴⁾を用いて以下のように定式化した。

- i) 圧縮強度: $f'_{c,t_e} = (0.229 \ln(t_e) + 0.24) f'_{c,28}$
- ii) 引張強度: $f_{t,t_e} = (0.2632 \ln(t_e) + 0.273) f_{t,28}$
- iii) 弾性係数: $E_{c,t_e} = (1.437 \sqrt{f'_{c,t_e} / f'_{c,28}} - 0.440) E_{c,28}$
- iv) クリープ係数: $\phi_{t_e} = \frac{0.67}{E_{c,28}} \int_0^{t_e} E_{c,t} e^{-0.17t} dt$

ただし、サフィックス 28 は標準養生下の材令 28 日を表し、 $0.5 \leq t_e \leq 16$ である。

2.2 附着

解析に用いる附着応力-すべり量曲線は、温度ひびわれ幅の制御を目的として実施された長滝ら⁵⁾の附着実験結果に基づいて定めた。実験条件は、使用鉄筋: $\phi 13\text{mm}$ 異形鉄筋, かぶり: $2D_s$ (D_s : 鉄筋径), 附着長さ: $3.0 D_s$, 附着作用域の埋め込み位置深さ: $4.5 D_s$, 載荷材令: 3 日, 載荷時コンクリート圧縮強度: 177kgf/cm^2 である。静的時 (ひびわれ発生時に対応) の附着応力-すべり量曲線は図-1 に示す通りである。

附着クリープは、図-2 に示すように、静的載荷時のすべり量に対する持続荷重により増加したすべり量の比として表し、すべり量 $\delta_{\max}(t_i)$ と載荷日数 t_i の関係を次のように定式化した。

$$\begin{aligned} \delta_{\max}(t_i) &= (1.0 + 8.4 t_i) \delta_{\max}(t_1) && (t_i \leq 0.05) \\ &= \left[1 + \frac{t_i - 0.05}{3.0(t_i - 0.05) + 2.3} \right] \delta_{\max}(t_1) && (t_i > 0.05) \end{aligned}$$

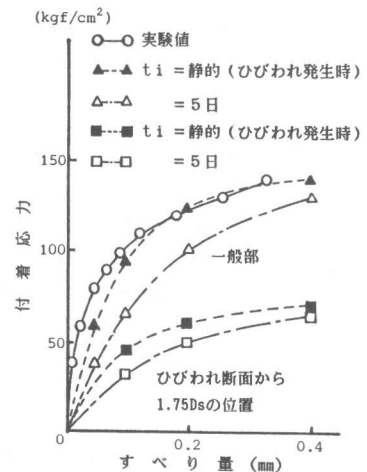


図-1 附着応力-すべり曲線

付着応力-すべり曲線は、六車・森田ら⁶⁾の式で近似し、ひびわれ断面近傍の付着の劣化領域を除く領域(一般部)の静的時の付着強度は $\tau_{\max}(x)=140\text{kgf/cm}^2$ 、それに対応するすべり量は $\delta_{\max}(t_i)=0.4\text{mm}$ とした。ひびわれ断面とそれから $3.5D_s$ 離れた位置までの領域を付着の劣化領域とし、 $\tau_{\max}(x)$ がひびわれ断面に向かって直線的に低下するとした⁷⁾。

以上より解析に用いられる付着応力-すべり量曲線の一例が図-1に示されている。

3. 解析

本解析は、ひびわれ幅算定の対象とする部位(例えば図-3に示す断面の斜線部、以下解析断面という)を取り出し、これを拘束力を受ける引張部材とするという考え方に立脚するものであり、ひびわれ幅は以下の手順で求められる。

3.1 仮定

- i) 温度は解析断面で一様かつ壁軸方向のいずれの断面においても等しい。
- ii) コンクリートの応力、ひずみはひびわれ発生後、有効引張断面においてのみ生じ、断面内で一様である。
- iii) 有効引張断面は、図-4に示すように、ひびわれ断面ではCEB-FIPのモデルコード⁸⁾にしたがい、鉄筋とコンクリートが完全に付着している領域では全断面有効であるとす、両者の間の領域では直線的に変化する。
- iv) 乾燥収縮の影響はない。

3.2 コンクリートおよび鉄筋の応力、ひずみ

打設後の経過日数 t_i 、座標 x における任意断面のコンクリートの全ひずみ $\epsilon_{ct,i}$ は、コンクリート応力 $\sigma_{c,i}$ を用い、重ね合わせ法を適用すれば次のようになる。

$$\epsilon_{ct,i} = \sum_{j=2}^i \frac{\sigma_{c,j} - \sigma_{c,j-1}}{\bar{E}_{c,j-1}} + \frac{1}{2} \sum_{j=2}^i (\sigma_{c,j} + \sigma_{c,j-1}) f(\Delta t_{j-1}) + \{\epsilon_{c,\Delta T}\}_i \quad (1)$$

ただし、右辺第1項は弾性ひずみ、第2項はクリープひずみ、第3項は温度変化ひずみである。 $\bar{E}_{c,j-1}$ は t_j と t_{j-1} 間の平均弾性係数であり、 $f(\Delta t_{j-1}) = (\phi_j - \phi_{j-1}) / \bar{E}_{c,j-1}$ 、 $\Delta t_j = t_j - t_{j-1}$ である。応力は式(1)より次式で表される。

$$\sigma_{c,i} = g_1(t_i) \{\epsilon_{ct,i} + g_0(t_i) \sigma_{c,i-1} + \sum_{j=2}^{i-1} \frac{\sigma_{c,j}}{g_1(t_j)} - g_0(t_j) \sigma_{c,j-1}\} - \{\epsilon_{c,\Delta T}\}_i \quad (2)$$

ただし、 $g_1(t_j) = 1 / [1/\bar{E}_{c,j-1} + f(\Delta t_{j-1})/2]$ 、 $g_0(t_j) = 1/\bar{E}_{c,j-1} - f(\Delta t_{j-1})/2$ である。

一方、鉄筋の全ひずみ $\epsilon_{st,i}$ は応力に参与するひずみ $\epsilon_{s,i}$ と温度変化ひずみ $\{\epsilon_{s,\Delta T}\}_i$ の和として $\epsilon_{st,i} = \epsilon_{s,i} + \{\epsilon_{s,\Delta T}\}_i$ (3)で示される。鉄筋応力度 $\sigma_{s,i}$ は式(3)の $\epsilon_{s,i}$ を用い次のようになる。

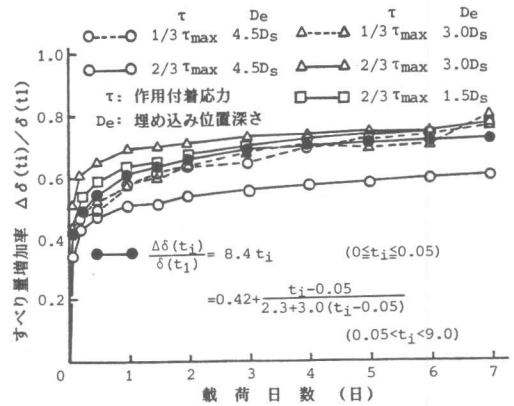


図-2 すべり量増加率-載荷日数の関係

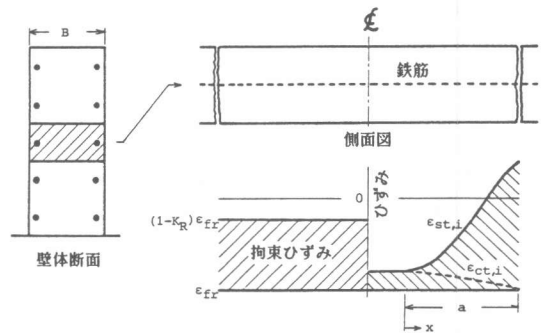


図-3 鉄筋、コンクリートのひずみ分布

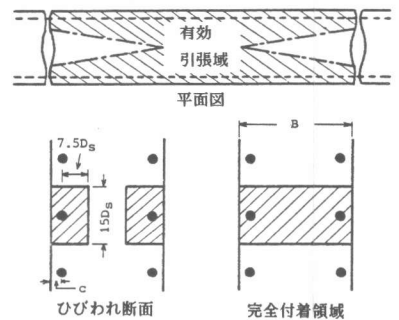


図-4 有効引張断面面積

$$\sigma_{s,i} = E_s \epsilon_{s,i} = E_s \{ \epsilon_{st,i} - \{ \epsilon_{s, \Delta T} \}_i \} \quad (4)$$

3.3 釣り合い条件

コンクリートと鉄筋の合力を $T_c(t_i, x)$, $T_s(t_i, x)$ とし、拘束力を P とすれば次の釣り合い式が成り立つ。

$$T_c(t_i, x) + T_s(t_i, x) = P \quad (5)$$

ただし、 $T_c(t_i, x) = A_c(x) \sigma_{c,i}$, $T_s(t_i, x) = A_s E_s \epsilon_{s,i}$ であり、 $A_c(x)$ は x における有効引張断面積、 A_s , E_s は鉄筋の断面積および弾性係数である。

上記の釣り合い条件式からある拘束力のもとで $\epsilon_{ct,i}$ と $\epsilon_{st,i}$ の関係が次のように求められる。

$$\begin{aligned} \epsilon_{ct,i} = & -\frac{A_s E_s}{A_c(x) g_1(t_i)} \epsilon_{st,i} + \frac{P + A_s E_s \{ \epsilon_{c, \Delta T} \}_i}{A_c(x) g_1(t_i)} \\ & - \left[g_0(t_i) \sigma_{c,j-1} - \sum_{j=2}^{i-1} \left\{ \frac{\sigma_{c,j}}{g_1(t_j)} - g_0(t_j) \sigma_{c,j-1} \right\} \right] \\ & + \{ \epsilon_{c, \Delta T} \}_i \end{aligned} \quad (6)$$

3.4 基礎方程式の誘導

釣り合い条件より軸方向の微小長さ変化 dx に対し合力の微小増分は次式を満足する。

$$dT_c(t_i, x) / dx + dT_s(t_i, x) / dx = 0 \quad (7)$$

式(7)より $d\epsilon_{ct,i} / dx$, $d\epsilon_{st,i} / dx$ および $\epsilon_{ct,i}$ の関係式が得られる。

一方、すべりとひずみ、鉄筋ひずみと付着応力および付着応力とすべりの間にはそれぞれ次のような関係がある。

$$d^2 \delta x / dx^2 = d\epsilon_{st,i} / dx - d\epsilon_{ct,i} / dx \quad (8)$$

$$d\epsilon_{st,i} / dx = (U_s / A_s E_s) \tau_x \quad (9)$$

$$\frac{\tau_x}{\tau_{max}(x)} = e^{-\frac{\ln\{(e-1)\delta x / \delta_{max}(t_i) + 1\}}{(e-1)\delta x / \delta_{max}(t_i) + 1}} \quad (10)$$

ただし、 U_s は鉄筋の周長である。

以上の関係から、 $S_x = \delta x / \delta_{max}(t_i)$ とすれば、ひびわれ間要素の基礎方程式として次式が導かれる。

$$\begin{aligned} \frac{d^2 S_x}{dx^2} = & \frac{U_s \tau_{max}(t_i)}{A_s E_s \delta_{max}(x)} e^{\left(1 + \frac{A_s E_s}{A_c(x) g_1(t_i)}\right) \frac{\ln\{(e-1)S_x + 1\}}{(e-1)S_x + 1}} \\ & + \frac{1}{\delta_{max}(t_i)} \left[g_0(t_i) \frac{d\sigma_{c,i-1}}{dx} - \sum_{j=2}^{i-1} \left\{ \frac{1}{g_1(t_j)} \frac{d\sigma_{c,j}}{dx} - g_0(t_j) \frac{d\sigma_{c,j-1}}{dx} \right\} \right] \\ & + \frac{1}{\delta_{max}(t_i) A_c(x)} \frac{dA_c(x)}{dx} \left[\epsilon_{ct,i} + g_0(t_i) \sigma_{c,i-1} - \sum_{j=2}^{i-1} \left\{ \frac{\sigma_{c,j}}{g_1(t_j)} \right. \right. \\ & \left. \left. - g_0(t_j) \sigma_{c,j-1} - \{ \epsilon_{c, \Delta T} \}_i \right] \end{aligned} \quad (11)$$

上式は、 $\epsilon_{ct,i}$ を含んでいるため所定の境界条件のもとで解くことができない。しかし、 $\epsilon_{ct,i}$ と $\epsilon_{st,i}$ は式(6)の関係があるので式(11)は次式を満足する $\epsilon_{ct,i}$ を用いれば解くことができる。

$$dS_x / dx = (\epsilon_{st,i} - \epsilon_{ct,i}) / \delta_{max}(t_i) \quad (12)$$

3.5 境界条件

温度ひびわれの場合、ひびわれ間隔が広く、全断面有効領域が存在することおよび付着作用領域の長さ a (図-3 参照) が未知であることなどから、境界条件は次のように定められる。

$$x=0; S_x=0, dS_x/dx = \Delta \epsilon / \delta_{max}(t_i) = 0, x=a; dS_x/dx = (\epsilon_{st,i} - \epsilon_{ct,i}) / \delta_{max}(t_i)$$

ただし、 $x=a$ においては $\epsilon_{st,i} = P / (A_s E_s) + \{ \epsilon_{s, \Delta T} \}_i$ であり、 $\epsilon_{ct,i}$ は $\{ \epsilon_{c, \Delta T} \}_i$ とひびわれ前の応力履歴によるクリープひずみの和とした。

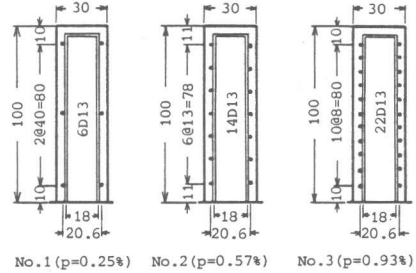


図-5 供試体の断面諸元 (unit:cm)

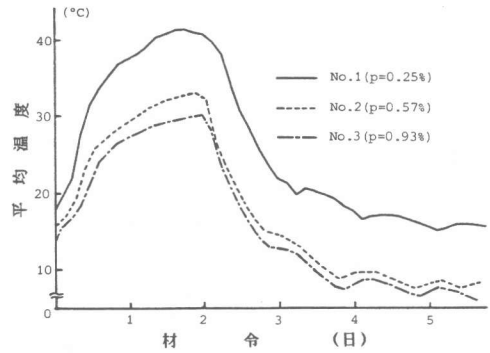


図-6 平均温度-材令の関係

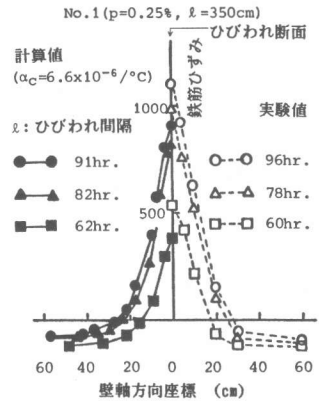


図-7 鉄筋ひずみ分布

3. 6 変形の適合条件

前述した拘束力Pは、拘束度KRと自由変形ひずみから決まる拘束ひずみと自由変形した状態から拘束力により生じた鉄筋の平均ひずみが等しいとすることにより求められる。

4. 実験値⁹⁾と計算値の比較

図-5は計算値との比較に用いた供試体の断面諸元であり、長さは15mである。これらの供試体は幅5m、深さ1.5mの基礎コンクリートの上に打設され、打設後48時間厚さ10cmの発泡スチロールで断熱された。図-6はこれらの供試体の解析断面(壁軸中央断面で高さ中央)の実測平均温度の経日変化を示したものである。

解析ではこの平均温度、ひびわれ間隔およびひびわれ発生時刻ともいずれも実測値を用い、拘束度は、ACI 207委員会の方法で求めた。

図-7は壁軸方向の応力に關する鉄筋ひずみ分布の推移について1例を示したものである。ひびわれ断面では計算値は、実験値より小さいが、すべり領域の長さやひずみがひびわれ断面から減少する傾向などについては両者はよく一致している。

図-8~図-10は鉄筋比が異なる3種類の供試体のひびわれ幅の経日変化について示したものである。計算値はコンクリートの線膨脹係数として2種類、すなわち標準的な値として $\alpha_c=10 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ と実測値を用いた場合について示した。

これによれば、ひびわれ幅の温度降下に伴う増加性状、ひびわれ幅におよぼす鉄筋比の影響などについて、計算値は定性的にも定量的にも実験値とかなりよく一致していることがわかる。

5. まとめ

よう壁などの整体構造物の温度ひびわれ幅の理論的な予測方法を示した。本計算値は実験値とかなりよく一致し、ひびわれ間隔およびひびわれ発生時期を適切に評価すれば、本方法は温度ひびわれ幅の有力な予測方法になると思われる。

本研究は文部省科学研究費(題目:鉄筋コンクリートの温度ひびわれとその制御に関する研究、種目:総合研究(A)、課題番号:59350031、代表:長滝重義)の援助のもとに行われたものであり厚く御礼申し上げる。

(参考文献) 1)ACI Committee 207:Effect of Restraint, Volume Change, and Reinforcement on Cracking of Massive Concrete, Jour. of ACI, 1973. 2)BSI:Code of Practice for the Structural Use of Concrete for Retaining Aqueous Liquid, London, BS5337, 1976. 3)長滝他:水和熱による温度ひびわれ幅の実用算定法、第7回コンクリート工学年講, 1985. 4)岩城他:セメントの水和熱に起因する温度応力解析手法に関する研究, 鹿島建設技研年報, 第28号, 1980. 5)長滝他:若材令における鉄筋とコンクリートとの付着特性, 東工大研究報告, N035, 1985. 6)六車他:鋼とコンクリートの付着に関する研究, 日本建築学会論文報告集, 1967. 7)黒正他:異形鉄筋とコンクリートの付着に関する研究, 日本建築学会大会, 1982. 8)CEB-FIP:Model Code for Concrete Structures, 1978. 9)首都高速道路公団:マスコンクリートのひびわれ制御実験報告書, 1985.

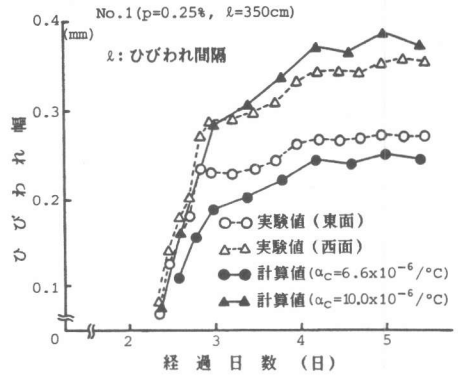


図-8 ひびわれ幅-経過日数の関係

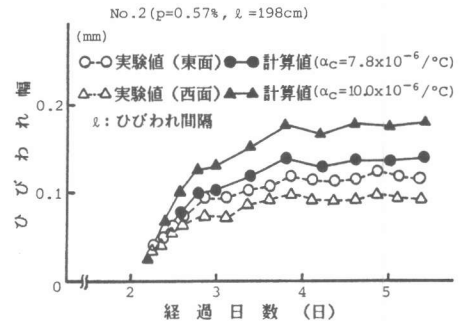


図-9 ひびわれ幅-経過日数の関係

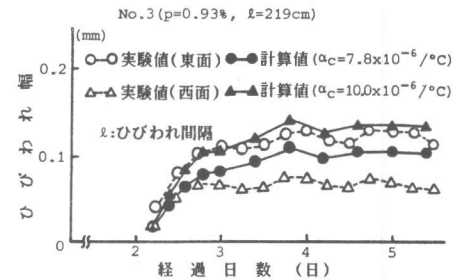


図-10 ひびわれ幅-経過日数の関係